

文章编号:1000-582X(2010)09-001-07

双离合式自动变速器建模与控制系统仿真

陈 然, 孙冬野, 刘永刚

(重庆大学 机械传动国家重点实验室, 重庆 400044)

摘 要:为了减少双离合式自动变速器(DCT)控制系统的开发时间和费用,利用 Matlab/SimDriveLine 车辆动力传动系统建模仿真软件,建立了 DCT 整车系统的动力学模型,采用神经网络训练改进了软件中的发动机模型,基于 Matlab/Simulink 系统设计了 DCT 车辆的起步、换挡过程以及换挡规律控制策略仿真模型。在此基础上,进行了 DCT 整车系统仿真。仿真实验结果表明所建立的 DCT 系统动力学模型及所设计的控制器的合理性和可行性,证明该方法建立的仿真模型适用于 DCT 控制系统开发,提高了系统设计的效率。

关键词:双离合式自动变速器;建模;神经网络;控制系统;计算机仿真

中图分类号:TP391; U463

文献标志码:A

Modeling and control system simulation of automobile DCT

CHEN Ran, SUN Dong-ye, LIU Yong-gang

(The State Key Laboratory of Mechanical Transmission, Chongqing University,
Chongqing 400044, P. R. China)

Abstract: In order to reduce development time and cost of dual-clutch automated mechanical transmission (DCT) control system, the dynamic model of automobile DCT control system is established by Matlab/SimDriveLine and the engine model is improved by neural network. Based on Matlab/Simulink, the simulation models of DCT control during starting phase, shift phase and shift rule are set up, and then the whole system of DCT is simulated. The simulation result indicates that the DCT system dynamic model and the designed controller are reasonable and feasible, and proofs that the model is suitable for developing DCT control system and improves the design efficiency of DCT system.

Key words: dual-clutch transmission; modeling; neural networks; control system; computer simulation

双离合式自动变速器(DCT)是一种将变速器档位按奇、偶数分别布置在 2 个离合器所联接的 2 个输入轴上,通过离合器的交替切换完成换挡过程,从根本上解决了机械式自动变速器(AMT)换挡动力中断带来的问题^[1-3]。然而,DCT 车辆的动力不中断优点导致其控制系统相对复杂。

为了加快控制器开发速度,降低成本,常常利用

离线仿真技术设计控制器。为了设计控制系统模型,需要建立被控对象模型来检验控制策略^[4-5]。自动变速器控制系统设计大多在 MATLAB/Simulink 中建立动力学模型,然而基于该平台的自动变速器模型,往往进行了诸多假设,有些只能反映自动变速器部分参数在控制策略执行时的变化趋势,需要不断地修改模型以及数学模型,而且建模过程相当

收稿日期:2010-04-05

基金项目:国家 863 计划资助项目(2006AA110114)

作者简介:陈然(1978-),男,重庆大学博士研究生,主要从事机电测控及车辆动力学控制研究。

孙冬野(联系人),男,重庆大学教授,博士生导师,(E-mail) dysun@cqu.edu.cn。

复杂^[6-7],对于复杂的系统(例如 DCT 系统)采用此方法建模相对困难,而且耗时。如果能够快速建立一个直观、图形化、更全面地反映自动变速器各部件性能的模型,则可以大大降低控制系统开发的时间与成本。MATLAB/SimDriveLine 是一个专业进行车辆动力传动系统建模仿真的软件,不需要复杂的数学推导,便可以快速建立图形化的车辆模型。笔者应用 MATLAB/SimDriveLine 软件建立了 DCT 汽车的整车模型,针对发动机模型的不足,采用神经网络学习功能改进发动机模型,基于 Matlab/Simulink 设计了汽车 DCT 控制器。并在此基础上,进行了 DCT 起步、换挡过程和换挡规律的动态仿真,大大提高了系统建模的效率,为解决复杂车辆系统的建模与控制提供了一条快捷有效的新途径。

1 DCT 系统模型框架

1.1 DCT 系统结构

DCT 将变速器的挡位按奇、偶数分别布置在与 2 个离合器所联接的输入轴上,以图 1 所示 DCT 传动系统结构为研究对象。当车辆以 1 挡行驶时, c_1 离合器接合,通过同步器连接到 m_1 轴上的齿轮,然后传递到输出轴。当控制系统判断车辆即将要升入 2 挡,通过控制同步器执行机构,提前将 2 挡被动齿轮与同步器 2 进行啮合,此时离合器 2 仍处于分离状态,2 挡还不传递动力;当达到 2 挡换挡时刻,通过控制离合器执行机构,使 c_1 离合器分离和 c_2 离合器的接合同时发生,然后 c_1 完全分离, c_2 完全接合,动力通过 m_2 传递到输出轴,此过程保证了换挡过程中输出轴的转矩不中断地传递到车轮,其他升、降挡过程与此类似^[8-9]。

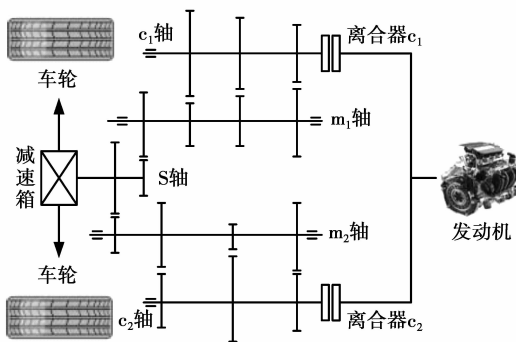


图 1 DCT 车辆动力传动结构图

1.2 DCT 系统模型框架

整车 DCT 系统模型框架如图 2 所示,可分为系

统动力学模型和控制系统模型两大部分,其中动力学模型包括发动机模型、离合器模型、变速器模型和车辆模型。控制系统模型包括发动机节气门开度控制、离合器接合压力控制和挡位控制 3 个部分。 n_e 为发动机转速, α 是节气门开度, T_e 为发动机输出扭矩, T_s 为输出轴扭矩, T_{c_1} 和 T_{c_2} 为两离合器从动盘扭矩, i_g 为变速比, P_{c_1} 和 P_{c_2} 为两离合器上的控制压力, c_1 和 c_2 分别为离合器 1 和 2, m_1 和 m_2 分别代表与 c_1 和 c_2 相联的变速器中间轴(通过同步器起变速作用)。

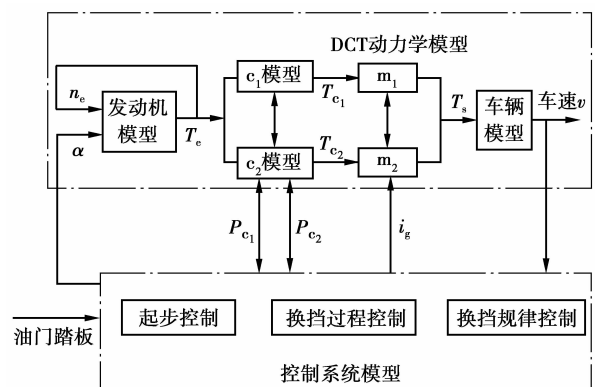


图 2 整车 DCT 系统模型框图

2 DCT 动力学模型

2.1 SimDriveLine 简介

Simdriveline 工具箱是 Matlab 新发布的模块,是专门为机械\车辆动力传动系统建模仿真设计的。跟传统的数学建模不同,Simdriveline 可以采用基本元素法按照实际物理系统来构建,可以直接选用转动惯量、离合器、变速器、车轮等自定义模块,能建立并仿真车辆传动系统的机构模型,通过它可以模拟、分析及控制车辆的各种系统,同时模型接口间以转速、力矩传递为主,具有双向性,动态特性很好,使用十分方便。

2.2 动力学建模

2.2.1 发动机模型

发动机特性主要指的是其性能指标随运行工况和控制调整情况的变化关系。Simdriveline 元件库中发动机输出扭矩只是节气门的函数。然而,大量实验证明,发动机的外特性曲线是发动机节气门开度 α 与发动机转速 n_e 的函数,即发动机输出扭矩 $T_e = f(\alpha, n_e)$,因为元件库中的发动机模型精度有限,必须建立精度高的发动机模型。

以发动机台架试验的数据作为源数据,以油门开度 α 和发动机转速 n_e 为输入,以转矩为输出,网络类型采用 BP 神经网络,隐层数为 2,2 层神经元数分别为 9、5 进行神经网络训练^[10-12],得出基于神经网络发动机转矩输出模型,即可确定发动机转矩特性三维图如图 3 所示。

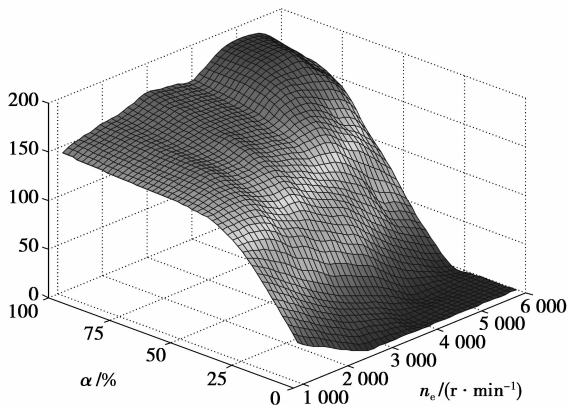


图 3 发动机神经网络三维转矩图

2.2.2 离合器和变速器模型

工具箱中离合器模型如图 4 所示, P 是控制压力, B 是主动轴接口, F 是从动轴接口, 点右键可以进行 μ 、 r 、 N 参数设置。离合器传递转矩为: $T_c = \mu \cdot r \cdot N \cdot P$, 式中 μ 是摩擦系数, r 是有效半径, N 是摩擦片数量, P 是控制压力, 同时也是与控制系统的接口, 由控制器控制。

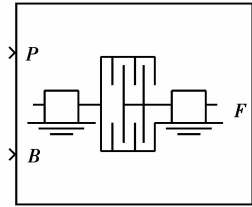


图 4 离合器模型

变速器模型如图 5 所示。 B_t 是输入轴接口, F_t 是输出轴接口, r_t 是可变速动比, 由控制器控制。

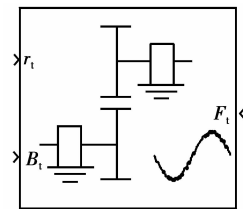


图 5 变速器模型

2.2.3 其他模型

其他还有转动惯性量及环境设置模块, 相对简单。车辆阻力模型主要计算坡道阻力、滚动阻力、风阻力等的总和。

2.2.4 整体模型

将各模块进行简单的连接, 即可得到 DCT 车辆整车动力学模型如图 6 所示。与控制系统的接口有: 节气门开度、 P_{c_1} 、 P_{c_2} 、奇数挡变速比、偶数挡变速比。

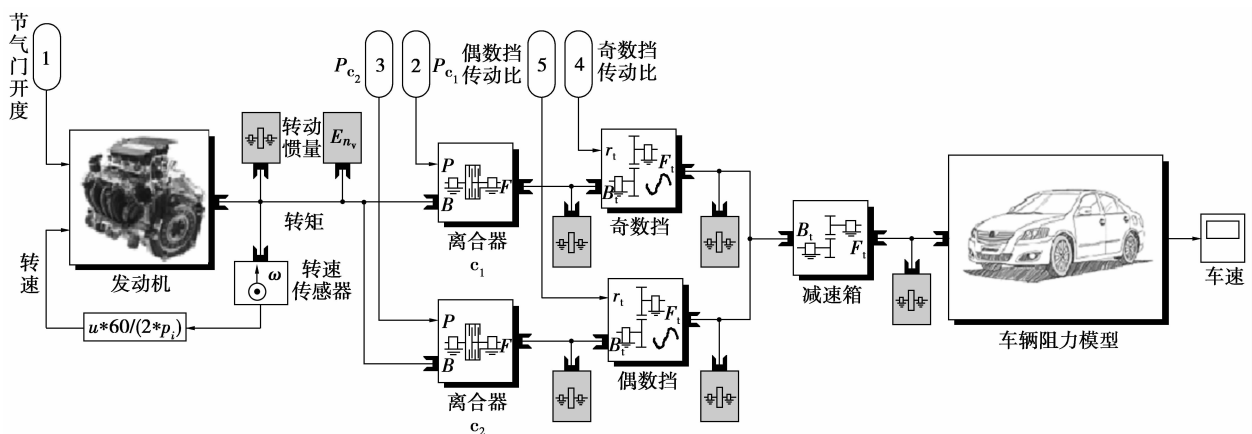


图 6 整车动力学模型

3 控制系统模型

DCT 的核心和难点是离合器起步控制、换挡过程压力控制以及换挡规律控制 3 个部分。

3.1 起步控制

DCT 起步控制目标有 3 点: 1) 车辆起步平稳, 冲击度小; 2) 滑摩功尽可能小, 延长离合器寿命; 3) 充分反映驾驶员起步意图。其控制策略和 AMT

一样,采用发动机恒转速模糊控制^[13]。

用油门开度来反映驾驶员起步意图,将驾驶员意图转化为发动机目标转速,选取某一油门开度下最大转矩时发动机转速作为发动机目标转速 n_{eo} ,发动机实际转速与目标速度差 Δn_{eo} 及其变化率 $d(\Delta n_{eo})/dt$ 为输入变量,以离合器接合压力 P 为输出量。若实际转速比目标转速高,则增加接合压力,从而增加发动机负载,使实际转速降低;反之则减小接合压力,发动机负载减少,使实际转速增大。

控制系统如图 7 所示。其中, α 是节气门开度。 n_e 为发动机实际转速, n_c 为从动盘转速, K_1 、 K_2 、 K_3 是相关系数。

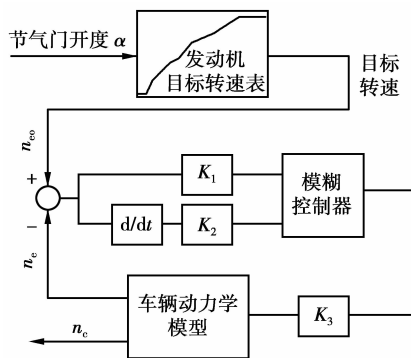


图 7 起步恒转速模糊控制图

Δn_{eo} 和 $d(\Delta n_{eo})/dt$ 双输入及单输出 P 控制量都分为 7 个模糊语言变量等级, {NB, NM, NS, O, PS, PM, PB}, 三者的论域 x, y, z 相同, 即 $\{-6, -5, -4, -3, -2, -1, 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6\}$ 。在总结熟练驾驶员经验的基础上, 得出起步控制模糊 IF-THEN 规则并形成模糊控制规则表(见表 1)。采用高斯型模糊隶属函数。

表 1 模糊控制规则的输出

输入	Δn_{eo}							
	NB	NM	NS	O	PS	PM	PB	
$d(\Delta n_{eo})/dt$	NB	NB	NB	NM	NM	NS	NS	O
	NM	NB	NM	NM	NS	NS	O	O
	NS	NB	NM	NS	NS	O	O	PS
	O	NM	NM	NS	O	O	PS	PS
	PS	NM	NS	NS	O	PS	PS	PM
	PM	NS	NS	O	PS	PM	PM	PB
	PB	NS	O	PS	PS	PM	PB	PB

3.2 换挡过程控制

DCT 最大的优点就是换挡动力不中断,其换挡过程可以看作是两离合器之间的动力切换,升挡过程两离合器之间的切换包括转矩相和惯性相 2 个阶段。转矩相是指该状态下一个摩擦元件打滑,另一个还未开始打滑,各构件之间只有转矩的分配与变动,无急剧的转速变化,所以惯性的影响可以不计;惯性相是指该状态下 2 个摩擦元件都打滑,故不仅有转矩的变化,同时伴有转速或传动比的急剧变化,它是产生冲击度最大的阶段。DCT 换挡过程控制目标有:1)换挡平稳,冲击度小,滑摩功尽可能小;2)发动机不熄火;3)两离合器之间没有负功率循环^[14-17]。

DCT 系统换挡过程的关键问题是控制两离合器切换的时序^[1]。以升挡为例,DCT 升挡过程中两离合器的控制策略如图 8 所示。

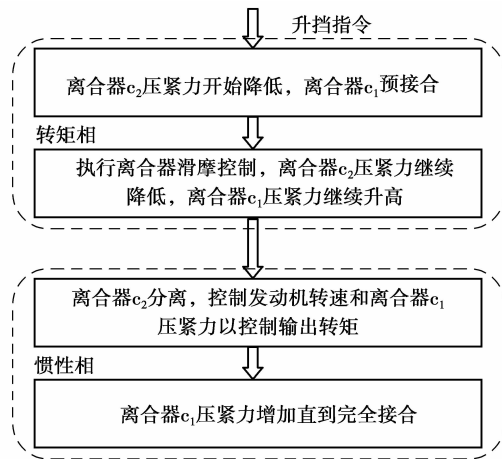


图 8 换挡过程控制策略

3.3 换挡规律控制

换挡规律是汽车自动变速系统的重要参数,是实现最佳动力性和最佳经济性换挡的基础。换挡规律设计的优劣是衡量汽车在采用自动变速技术后能否充分发挥其动力性、经济性及可操控性的关键。笔者以动力性换挡为例,采用两参数换挡规律。由节气门开度 α 和车辆实际速度 v 通过最佳动力换挡规律曲线决定挡位。

DCT 动力性升挡规律所采用的策略参考文献 [18-20]。图 9 是换挡规律数据图,图 10 是换挡控制策略图。

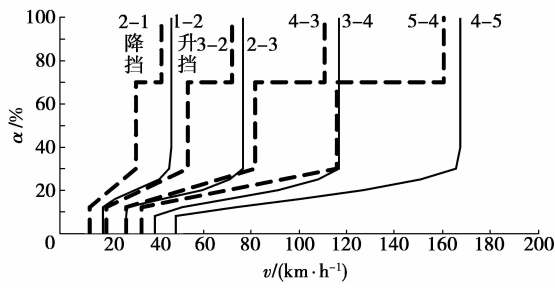


图 9 换挡规律

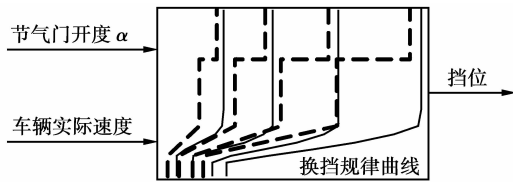
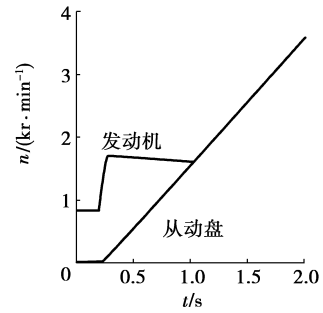
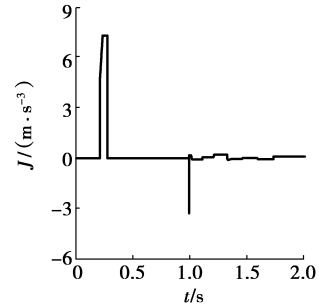


图 10 换挡控制系统



(a)起步接合



(b)冲击度

图 11 起步过程仿真图

4 仿真实验分析

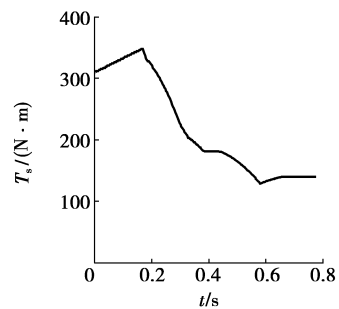
为了验证模型的效果,对 DCT 车辆动力学模型和控制模型进行联合仿真,仿真结果如图 11-13 所示。车辆主要结构参数如表 2 所示。

表 2 轿车参数

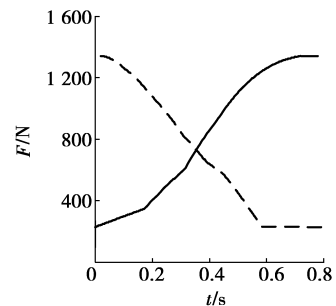
名称	数量
排量	2 L
发动机最大扭矩	186.2 N·m
发动机最高转速	6 500 r/min
挡 1-5 挡传动比	3.42\2.07\1.36\0.95\0.88
迎风面积	2.445 m ²
其他 空气阻力系数	0.33
其他 滚动阻力系数	$f=0.000\ 046\ 3 * v+0.008\ 3$
其他 轮胎滚动半径	308 mm

图 11 为节气门开度为 30%时车辆起步过程发动机转速、从动盘转速变化及冲击度仿真图。由图 11(a)可知,在 0.30 s 时,发动机达到目标转速 1 700 r/min 并保持基本无波动,在 1 s 左右转速同步。由图 11(b)可知,在车辆刚开始运动(0.25 s)及发动机转速、从动盘转速相同时冲击度最大,最大达到 $7.8\text{ m/s}^{-3} < 10.0\text{ m/s}^{-3}$ (标准)。按发动机恒转速模糊控制策略可以很好地控制转速和冲击度,同时能较好地反映驾驶员意图。

图 12 是 DCT 车辆 1 挡升 2 挡换挡过程仿真图。从图 12(a)、(c)可以看出,输出轴转矩平稳地减少,发动机转速变化较柔和。图 12(b)、(d)可以看出是两离合器在 0.60 s 左右完成交替,并且压力过渡平稳,在 0.18 和 0.61 s 左右冲击度最大,达到 $8.9\text{ m/s}^{-3} < 10\text{ m/s}^{-3}$ (标准)。



(a)输出转矩



(b)压力时序

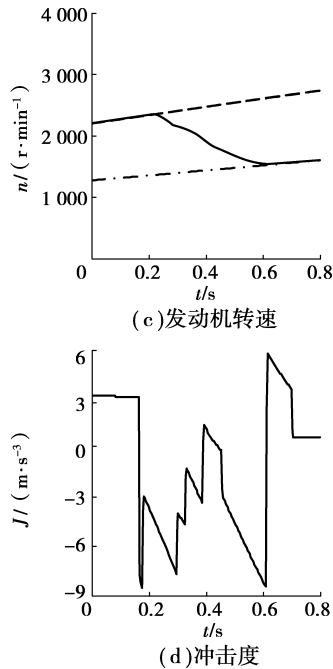


图 12 换挡过程仿真图

图 13 是 DCT 车辆换挡规律仿真图。图 13(a) 是给定的巡航车速,图 13(b)是挡位随车速变化和节气门开度为 18% 时变化情况。由图可知,在 0.60 s,车速达到 24 km/h,此时由 1 挡升 2 挡,在 0.65 s,车速达到 33 km/h,此时由 2 挡升 3 挡,其他类似。在 0.85 s,车速下降到 18 km/h,此时由 3 挡下降至 2 挡,在 0.90 s,车速下降到 15 km/h,此时由 2 挡下降至 1 挡,其他类似。对比升、降挡过程,降挡规律的速度明显比升挡规律速度低,有效避免了频繁换挡现象的发生。

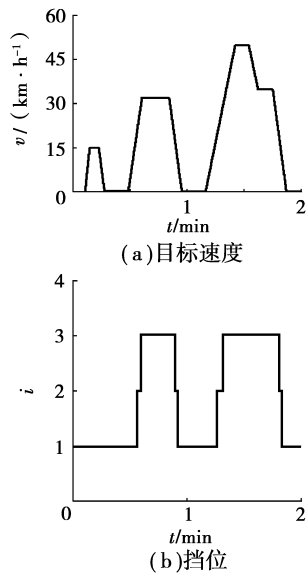


图 13 换挡规律仿真图

5 结 语

1) 系统地建立了汽车 DCT 系统动力学模型以及控制系统的模型,并进行了仿真研究,仿真结果验证了所建系统动力学模型及控制策略的可行性,为汽车 DCT 系统的产品开发提供了方法和理论基础。

2) 仿真实验显示 MATLAB/SimDriveLine 是一个车辆系统设计优良、高效、直观的建模和仿真分析工具软件,大大节省了 DCT 的开发时间与成本,在车辆控制设计中具有良好的应用前景。

参考文献:

- [1] 吴光强,杨伟斌,秦大同. 双离合式自动变速器控制系统的关键技术[J]. 机械工程学报, 2007, 43(2): 13-21.
WU GUANG-QIANG, YANG WEI-BIN, QIN DA-TONG. Key technique of dual clutch transmission control system [J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2007, 43(2):13-21.
- [2] KULKARNI M, SHIM T, ZHANG Y. Shift dynamics and control of dual-clutch transmissions [J]. Mechanism and Machine Theory, 2007, 42(2):168-182.
- [3] ZHANG Y, CHEN X, TOBLER W. Dynamic modeling and simulation of a dual-clutch automated layshaft transmission[J]. Journal of Mechanical Design, 2005, 127(3):168-182.
- [4] 张祥,杨志刚,张彦生. 汽车 AMT 系统的 Matlab/Simulink 建模与仿真 [J]. 系统仿真学报, 2007, 19(14):3339-3344.
ZHANG XIANG, YANG ZHI-GANG, ZHANG YAN-SHENG. Modeling and simulation of automobile AMT system application with Matlab/Simulink [J]. Journal of System Simulation, 2007, 19(14): 3339-3344.
- [5] 王银燕,杜剑维,王贺春,等. 基于 GT-power 与 Simulink 的发动机及其控制系统仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(16):4379-4381.
WANG YIN-UYAN, DU JIAN-WEI, WANG HE-CHUN, et al. Simulation of engine and control system based on GT-power and Simulink [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(16):4379-4381.
- [6] 张玉良,高峰,杜发荣,等. 基于 dSPACE 的车辆起步控制策略硬件在回路仿真[J]. 系统仿真学报, 2008, 20(10):2722-2725.
ZHANG YU-HIANG, GAO FENG, DU FA-RONG, et al. Hardware-in-the-loop simulation of vehicle starting control method based on dSPACE [J]. Journal of System Simulation, 2008, 20(10):2722-2725.

- [7] SONG X Y, SUN Z X, YANG X J, et al. Modelling, control, and hardware-in-the-loop simulation of an automated manual transmission [J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2009, 224(2):143-160.
- [8] GOETZ M, LEVESLEY M C, CCROLLA D A. Dynamics and control of gearshifts on twin-clutch transmission[J]. *Journal of Automobile Engineering*, 2005, 219(8): 951-963.
- [9] 刘振军,胡建军,李光辉,等. 模糊神经网络的自动变速汽车换挡规律分析[J]. *重庆大学学报*, 2009, 32(8): 897-903.
- LIU ZHEN-JUN, HU JIAN-JUN, LI GUANG-HUI, et al. Analysis of shift schedule for the automatic transmission vehicle based on fuzzy neural network [J]. *Journal of Chongqing University*, 2009, 32(8): 897-903.
- [10] 胡建军,秦大同,杨为. 神经网络的BP算法在发动机建模中的应用[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2004, 27(7):18-20.
- HU JIAN-JUN, QIN DA-TONG, YANG WEI. Application of BP NN for engine modeling [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2004, 27(7):18-20.
- [11] 阴晓峰,谭晶星,雷雨龙. 基于神经网络发动机模型的动态三参数换挡规律[J]. *机械工程学报*, 2005, 41(11):174-178.
- YIN XIAO-FENG, TAN JING-XING, LEI YU-LONG. Dynamic shift schedule with 3-parameter based on neural network model of engine [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2005, 41(11):174-178.
- [12] 杨伟斌,吴光强,秦大同. 人工神经网络的各参数对系统辨识精度的影响分析及各参数的确定方法[J]. *机械工程学报*, 2006, 42(7):217-221.
- YANG WEI-BIN, WU GUANG-QIANG, QIN DA-TONG. Influence and analysis of artificial neural network's parameters on system identification accuracy and determination method of parameters [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(7): 217-221.
- [13] 孙冬野,秦大同. 汽车离合器局部恒转速起步自动控制研究[J]. *机械工程学报*, 2003, 39(11):108-111.
- SUN DONG-YE, QIN DA-TONG. Clutch starting control with a constant engine speed in part process for a car [J]. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2003, 39(11):108-111.
- [14] 黄建明,曹长修,苏玉刚. 机械式自动变速器的换挡控制[J]. *重庆大学学报:自然科学版*, 2005, 28(1): 86-89.
- HUANG JIAN-MING, CAO CHANG-XIU, SU YU-GANG. Shift control for automated mechanical transmission [J]. *Journal of Chongqing University: Natural Science Edition*, 2005, 28(1):86-89.
- [15] ZHENG Q, SRINIVASAN K, RIZZONI G. Transmission shift controller design based on a dynamic model of transmission response [J]. *Control Engineering Practice*, 1999, 7(8):1007-1014.
- [16] LIU Y, QIN D. A systematic model for dynamics and control of dual clutch transmissions [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2009, 131(6):1-7.
- [17] ADOLFO S. Advances in the automotive systems-an overview of dual-clutch transmissions [J]. *Recent Patents on Mechanical Engineering*, 2009, 2(2): 93-101.
- [18] QIN G H, GE A L, ZHAO J H, et al. Cruise control of automated manual transmission vehicle [J]. *Computing and Control Engineering Journal*, 2003, 14(2):18-21.
- [19] ZOU Z, ZHANG Y, ZHANG X, et al. Modeling and simulation of traction drive dynamics and control [J]. *Journal of Mechanical Design*, 2001, 123(4):556-561.
- [20] KIM D H, YANG K J, HONG K S, et al. Smooth shift control of automatic transmissions using a robust adaptive scheme with intelligent supervision [J]. *Journal of Vehicle Design*, 2003, 31(3):250-272.

(编辑 张 苹)